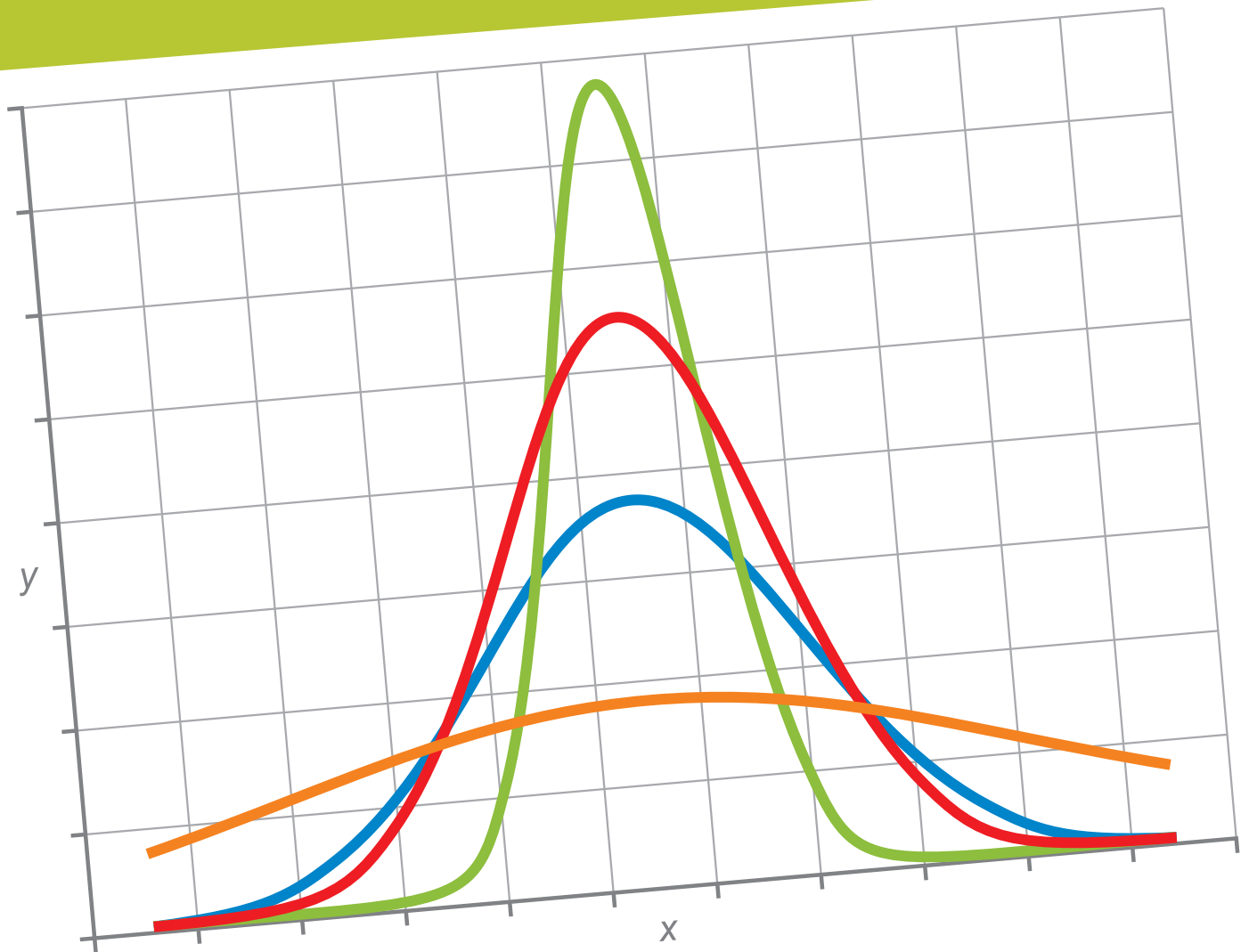


LES GUIDES TECHNIQUES  
DU COLLÈGE FRANÇAIS DE MÉTROLOGIE



# 27 EXEMPLES D'ÉVALUATION D'INCERTITUDES D'ÉTALONNAGE

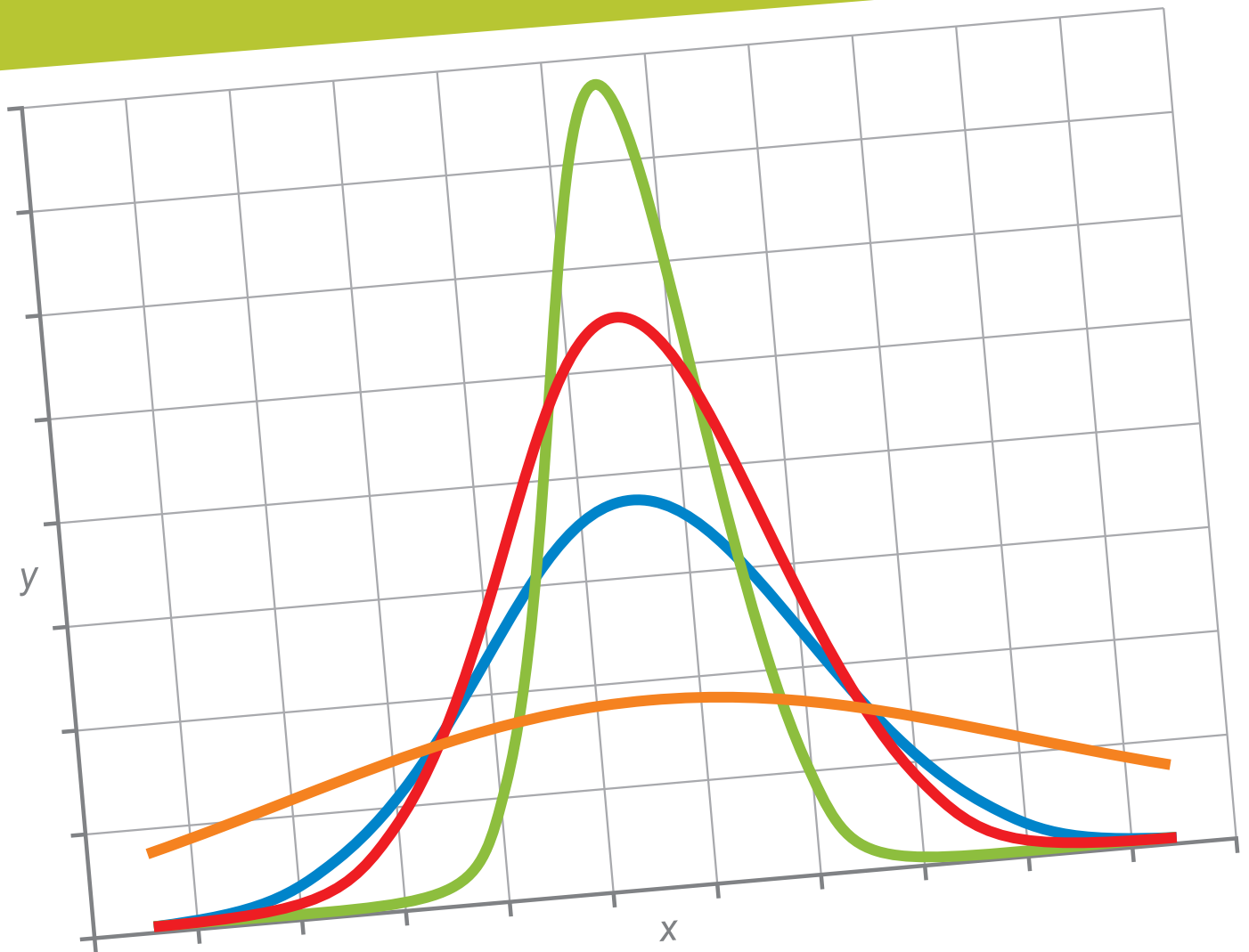


**LES GUIDES TECHNIQUES**  
DU COLLÈGE FRANÇAIS DE MÉTROLOGIE

# 27 EXEMPLES D'ÉVALUATION D'INCERTITUDES D'ÉTALONNAGE



LES GUIDES TECHNIQUES  
DU COLLÈGE FRANÇAIS DE MÉTROLOGIE



# 27 EXEMPLES D'ÉVALUATION D'INCERTITUDES D'ÉTALONNAGE

© CFM et AFNOR Éditions 2017

Couverture : création AFNOR Éditions – Exécution : Atelier du Livre (Caroline Joubert)

Crédit photo © 2017 Adobe Stock

ISBN 978-2-12-465611-0



Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (loi du 1<sup>er</sup> juillet 1992, art. L 122-4 et L 122-5, et Code pénal, art. 425).

Collège Français de Métrologie  
1, rue Gaston Boissier  
75724 Paris Cedex 15  
Tél. : + 33 (0) 4 67 06 20 36  
[www.cfmetrologie.com/fr/bibliotheque](http://www.cfmetrologie.com/fr/bibliotheque)

AFNOR  
11, rue Francis de Pressensé  
93571 La Plaine Saint-Denis Cedex  
Tél. : + 33 (0) 1 41 62 80 00  
[www.afnor.org/editions](http://www.afnor.org/editions)



COLLÈGE FRANÇAIS DE  
**MÉTROLOGIE**

Le Collège Français de Métrologie (CFM) est une association à vocation industrielle qui rassemble tous les acteurs du monde de la mesure : utilisateurs de moyens de mesure dans l'industrie et les laboratoires, responsables de laboratoires et de centres techniques, fabricants et prestataires, universitaires et autres.

Fondé avec le soutien du Ministère chargé de l'Industrie, du Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE), du Centre Technique des Industries Aéronautiques et Thermiques (CETIAT) et de Peugeot Citroën Automobiles (PSA), le CFM rassemble aujourd'hui près de 500 adhérents.

Apporteur d'informations et de contenu technique, notre mission est de vous permettre d'améliorer et d'optimiser vos processus de mesure. Les professionnels de tous niveaux et de tous les secteurs d'activités sont concernés.

Le but est de vous faire gagner du temps et de vous permettre de répondre au plus vite à vos interrogations.

Grâce à sa bibliothèque technique et notamment à ses Guides, le CFM est devenu la référence de la documentation dans le monde de la mesure.

Le rapprochement avec AFNOR Éditions, qui est lui aussi est un autre référent mais de la Norme, permettra aux deux entités de se compléter l'un et l'autre tout en gardant leurs niveaux d'exigence et tout en continuant d'améliorer les connaissances.

Véritable pôle d'échange qui facilite les rencontres et le partage d'expériences, intégrez vous aussi notre réseau en devenant l'un de nos membres privilégiés !

Visitez notre site Internet et analysez toute notre offre sur [www.cfmometrologie.com](http://www.cfmometrologie.com).

**Prenez la mesure de votre avenir !  
Le CFM**

**afnor**  
ÉDITIONS

Vous ne connaissiez pas encore AFNOR en tant qu'éditeur ? Pourtant, depuis plusieurs années nous nous affirmons en tant qu'acteur de premier plan dans le paysage de la littérature professionnelle !

Face aux grandes tendances qui impactent votre environnement économique, nous vous offrons les meilleures solutions.

Dans un monde où les risques externes sont nombreux, AFNOR Éditions apporte de véritables solutions et méthodes pour aider les dirigeants dans leurs prises de décision.

Quels que soient votre secteur d'activité et votre fonction dans l'entreprise, nous vous proposons un ouvrage capable de satisfaire vos attentes. Pour répondre à vos problématiques, nous avons spécialement développé des collections pratiques. Celle coéditée avec le CFM est la dernière-née !

Cette collection vous assure les compétences des meilleurs experts et traite de l'ensemble des besoins auxquels vous êtes confrontés au quotidien.

Cette volonté d'accompagner votre développement et d'assurer votre pérennité est la marque de fabrique d'AFNOR Éditions. C'est notre mission.

Pour l'accomplir et la mener à bien, nous sélectionnons des auteurs experts et reconnus, ayant une véritable expérience de terrain.

Capables de transmettre simplement les outils, les méthodologies et les connaissances nécessaires, ils vous permettront d'aller de l'avant et d'améliorer vos performances.

Consultez sans tarder l'ensemble de notre catalogue de plus de 570 titres sur [www.boutique.afnor.org/livres](http://www.boutique.afnor.org/livres).

**Accédez au savoir en illimité !  
AFNOR Éditions**





# AVANT PROPOS

---

Le Ministère chargé de l'industrie, dans le cadre de sa procédure « Partenaires Pour l'Europe » a soutenu, en 1999, le projet de publication d'un recueil d'exemples d'évaluation d'incertitude d'étalonnage. Le Collège Français de Métrologie, réédite régulièrement depuis cet ouvrage. Le succès de ce document, est le signe d'un intérêt constant de la communauté des métrologues.

Les exemples présentés dans ce document ont été rédigés par des ingénieurs et des techniciens maintenant rassemblés au sein du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE). Ils s'adressent aux personnes chargées dans les laboratoires de métrologie d'évaluer, de justifier les incertitudes d'étalonnage et d'établir les meilleures possibilités d'étalonnage de leur laboratoire. Bien évidemment ce recueil pourra être utilisé par toute personne cherchant à approfondir ses connaissances dans le domaine de l'évaluation des incertitudes.

Depuis la publication par le Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM) du Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (JCGM 100 :2008 GUM<sup>1</sup>), on peut considérer que les utilisateurs disposent d'une référence reconnue au plan international. L'application de ce guide n'est pas toujours facile d'autant plus qu'il n'y a pas généralement de solution unique pour mener une évaluation d'incertitude. La publication de ce recueil d'exemples, doit permettre de montrer la diversité des approches possibles et de proposer des solutions concrètes. Il est souhaitable que le lecteur s'approprie les exemples et la démarche pour l'évaluation des incertitudes d'étalonnage. La compréhension de cette démarche lui permettra de devenir autonome pour transposer cette méthode à ses cas particuliers et ainsi être en mesure d'évaluer l'incertitude de ses propres étalonnages.

Le Collège Français de Métrologie espère que la nouvelle édition de ce recueil permettra de faire progresser l'ensemble de la communauté des métrologues.

**Marc PRIEL**  
**Directeur Honoraire de la Métrologie**  
**Laboratoire national de métrologie et d'essais**  
**Novembre 2013**

---

<sup>1</sup> Evaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure JCGM 100 :2008 (GUM 1995 avec des corrections mineures), document téléchargeable sur le site du BIPM [www.bipm.org](http://www.bipm.org)

# SOMMAIRE

---

<b>EXEMPLES DU DOMAINE ÉLECTRICITÉ</b>	<b>1</b>
▪ Étalonnage d'un ampèremètre .....	3
▪ Étalonnage d'un millivoltmètre haute fréquence .....	11
▪ Étalonnage d'une résistance .....	19
▪ Étalonnage d'une résistance de haute valeur .....	27
▪ Étalonnage d'un condensateur .....	35
▪ Étalonnage d'un affaiblisseur fixe. Méthode par variation de puissance .....	43
▪ Étalonnage d'une source de bruit radioélectrique .....	57
▪ Étalonnage d'un convertisseur thermique .....	63
▪ Étalonnage d'une inductance .....	71
▪ Étalonnage d'un calibrateur .....	77
<b>EXEMPLES DU DOMAINE MÉCANIQUE</b>	<b>85</b>
▪ Mesure de cales étalons par comparaison mécanique .....	87
▪ Étalonnage d'un manomètre métallique .....	105
▪ Étalonnage d'un pied à coulisse .....	113
▪ Étalonnage d'un capteur de pression à sortie électrique .....	121
▪ Étalonnage d'une fiole jaugée .....	131
▪ Étalonnage d'un micromètre 0-25 mm .....	141
▪ Estimation de l'incertitude pour l'utilisation d'une balance de pression .....	145
▪ Étalonnage d'un viscosimètre par comparaison directe à un viscosimètre étalon .....	151
<b>EXEMPLES DU DOMAINE RAYONNEMENTS</b>	<b>159</b>
▪ Étalonnage des luxmètres .....	161
▪ Étalonnage de radiomètres dans l'ultraviolet en éclairage énergétique à 365 nm .....	167
▪ Étalonnage des radimètres .....	177
▪ Étalonnage des spectroradiomètres .....	183
<b>EXEMPLES DU DOMAINE TEMPÉRATURE</b>	<b>193</b>
▪ Étalonnage des thermomètres à résistance de platine .....	195
▪ Étalonnage des indicateurs de température par simulation électrique .....	209
▪ Étalonnage d'un thermomètre numérique .....	223
▪ Étalonnage des couples thermoélectriques .....	231
<b>EXEMPLE DU DOMAINE CHIMIE</b>	<b>247</b>
▪ Étalonnage en titrimétrie volumétrique .....	249

# **EXEMPLES DU DOMAINE ÉLECTRICITÉ**



# ÉTALONNAGE D'UN AMPÈREMÈTRE

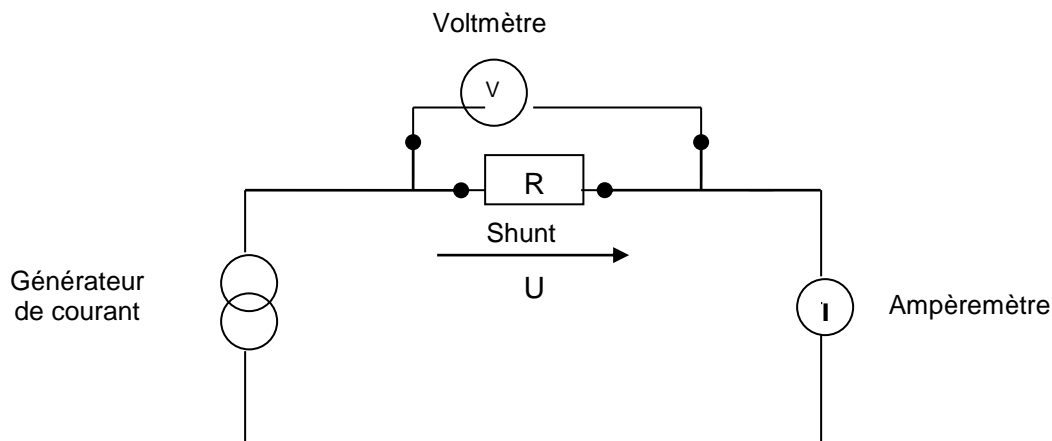
Isabelle BLANC, Laboratoire National de Métrologie et d'Essais

## 1. INTRODUCTION : PRÉSENTATION DE L'EXEMPLE

On se propose d'estimer l'incertitude d'étalonnage en courant continu d'un ampèremètre.

La méthode d'étalonnage consiste à comparer la valeur d'un courant connu à la valeur affichée sur l'ampèremètre en étalonnage.

Le principe de l'étalonnage est illustré par le schéma ci-dessous :



L'équipement requis est constitué d'une source de courant relativement stable, un shunt et un voltmètre numérique étalonnés.

La valeur du courant de référence est déduite de la loi d'Ohm.

La valeur nominale du shunt ( $R$ ) est  $0,1 \Omega$ . L'incertitude avec laquelle il est étalonné est  $2 \cdot 10^{-4} \cdot R$ . La dérive dans le temps est estimée à  $3 \mu\Omega$  par an. Son coefficient de température est évalué à  $50 \cdot 10^{-6} \cdot R / ^\circ\text{C}$ . Le shunt a été choisi pour supporter le courant le traversant sans échauffement.

Le voltmètre est étalonné avec une incertitude de  $5 \cdot 10^{-5} \cdot U + 0,5 \mu\text{V}$ . La résolution est  $1 \mu\text{V}$ . L'impédance d'entrée du voltmètre est supérieure à  $1 \text{ G}\Omega$  et le courant d'entrée inférieur à  $50 \text{ pA}$ .

La stabilité de la source est  $0,1\%$ .

L'ampèremètre en étalonnage est un ampèremètre numérique de résolution  $10 \mu\text{A}$  sur le calibre  $2\text{A}$ . Sur ce calibre, la chute de tension maximale est  $0,5\text{V}$ .

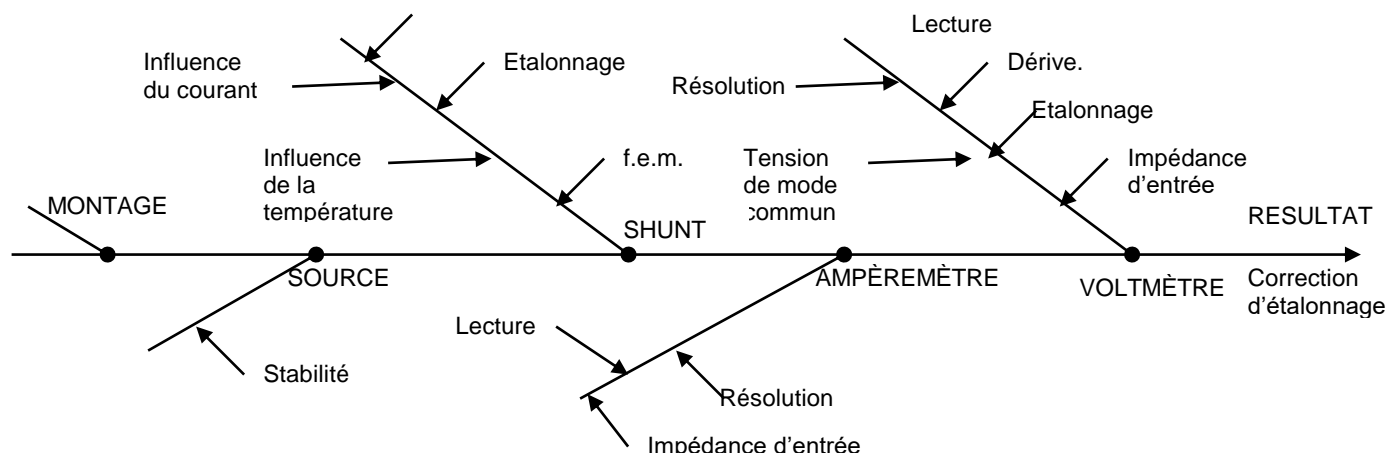
La température ambiante est de  $(22 \pm 2)^\circ\text{C}$ .

Considérons, pour la suite l'étalonnage du point  $1\text{A}$ . La démarche proposée et l'évaluation de l'incertitude d'étalonnage s'appliquent de la même manière pour tout autre point.

## 2. ANALYSE DU PROCESSUS ET MODE OPÉRATOIRE

### 2.1. ANALYSE DES CAUSES D'ERREUR

A priori, des erreurs interviennent pour différentes causes. Ces différentes erreurs sont listées dans le schéma suivant :



### 2.2. MODE OPÉRATOIRE

L'opérateur réalise le montage. Le courant traversant le shunt et l'ampèremètre, l'opérateur relève simultanément la valeur de U (sur le voltmètre) et I (sur l'ampèremètre). Il répète l'opération 4 fois.

### 2.3. MODÉLISATION DU PROCESSUS DE MESURE

Le processus est modélisable en appliquant la loi d'Ohm.

Le courant traversant l'ampèremètre ( $I_a$ ) est égal aux instabilités près de la source et aux fluctuations près de la lecture à :

$$I_a = \frac{U}{R}$$

U étant la tension mesurée aux bornes du shunt de valeur R.

Plus exactement : 
$$I_a = \frac{\bar{I}_v + C_v}{R + C_R}$$

où  $\bar{I}_v$  est la valeur moyenne des lectures sur le voltmètre.

$C_v$  la correction sur la tension lue sur le voltmètre.

$C_R$  la correction sur le shunt.

La valeur du courant de référence est comparée à l'affichage sur l'ampèremètre. L'écart entre la valeur de référence et l'affichage est la correction  $\delta$  qu'il faut appliquer à l'ampèremètre pour obtenir la valeur vraie :

$$\delta = \frac{\bar{I}_v + C_v}{R + C_R} - \bar{I}_a + C_I \quad (1)$$

où  $\bar{I}_a$  est la valeur moyenne des lectures sur l'ampèremètre.

$C_I$  la correction correspondant à l'introduction de l'ampèremètre dans le montage.

Remarque : il conviendrait de considérer les erreurs introduites par le montage. Ces contributions (influence du bruit produit par les câbles de mesure, influence des courants de boucle,...) seront négligées par la suite.

Les lectures fluctuent aléatoirement (voltmètre, ampèremètre). Les valeurs lues étant proches, la correction qu'il faudrait leur apporter est supposée indépendante de ces lectures. L'incertitude-type associée est déterminée par une méthode de type A. Cette composante intègre les défauts d'instabilité de la source de courant.

**$C_V$  est la correction sur la tension lue sur le voltmètre.**

Cette correction tient compte de l'étalonnage du voltmètre (valeur à tirer du certificat d'étalonnage). L'incertitude-type associée est déduite du certificat d'étalonnage.

La résolution du voltmètre, la dérive entre deux étalonnages et l'influence de l'impédance d'entrée du voltmètre et la tension de mode commun contribuent à l'incertitude de mesure.

**$C_R$  est la correction sur le shunt.**

La correction à appliquer sur la valeur nominale de la résistance tient compte :

- de son étalonnage (valeur à tirer du certificat d'étalonnage),
- de la dérive entre deux étalonnages,
- de l'influence de la température, différente de celle d'étalonnage,
- de l'influence de la puissance (échauffement du shunt).

La résistance est étalonnée régulièrement. La correction est relevée dans le certificat d'étalonnage, ainsi que l'incertitude-type associée. La correction due à la dérive entre deux étalonnages est prise nulle et l'incertitude-type associée est déduite du suivi métrologique de la résistance.

Le coefficient de température du shunt est connu. Il est donc aisé de calculer et appliquer une correction sur la valeur du shunt et de lui associer une incertitude-type déduite des conditions d'environnement.

Le shunt a été étalonné pour différents courants de mesure. La valeur d'étalonnage sous un courant de 1A est donnée dans le certificat. On attribue à la correction une valeur nulle en lui associant une incertitude-type déduite des résultats d'étalonnage.

**$C_i$  est la correction correspondant à l'introduction de l'ampèremètre dans le montage**

Du fait de l'introduction de l'ampèremètre dans le montage, le courant mesuré diffère de celui à mesurer.

La résolution de l'ampèremètre et l'influence des courants de fuite à l'entrée de l'ampèremètre contribuent à l'incertitude de mesure. On attribue à la correction une valeur nulle en lui associant une incertitude-type déduite des caractéristiques de l'ampèremètre.

### 3. CALCUL DES INCERTITUDES-TYPES DES GRANDEURS D'ENTRÉE

#### 3.1. TRAITEMENT DES LECTURES

Les  $n$  lectures sont traitées en utilisant une méthode de type A.

$$\text{On a : } \bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_i$$

et l'incertitude-type correspondante est déduite de l'écart-type expérimental de la moyenne à un coefficient multiplicatif ( $k$ ) près tenant compte du nombre restreint de mesures.

$$u(\bar{l}) = k \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (l_i - \bar{l})^2}$$

En effet, rappelons que l'incertitude-type obtenue par une méthode de type A se calcule comme étant égal à l'écart-type expérimental de la moyenne à condition que le nombre d'observations soit suffisamment grand. En supposant la loi de probabilité normale, cet état de fait peut être pris en compte à travers la loi de Student (note du §4.2.3. du guide pour l'expression de l'incertitude de mesure).

Facteur de Student pour un niveau de confiance de 99,73 % (Table G2 du guide pour l'expression de l'incertitude de mesure) :

nombre de degrés de liberté = nombre d'observations	3	4	5	10	20	$\infty$
facteur de Student	9,2	6,6	5,5	4	3,4	3

$k$  peut être calculé comme le rapport du facteur de Student sur le facteur approprié à la loi normale pour le même niveau de confiance.

Pour un grand nombre de mesures, on aurait  $k = 1$ .

Dans le cas présent,  $n = 4$  et  $k = 2,2$ .

Le calcul numérique est présenté dans le tableau suivant :

Lecture n°	Valeur lue sur le voltmètre (en mV)	Valeur lue sur l'ampèremètre (en A)
1	100,125	1,00141
2	100,117	1,00138
3	100,109	1,00116
4	100,119	1,00126
Moyenne	100,118	1,00130
Ecart-type expérimental	0,0066	0,00011
Ecart-type expérimental de la moyenne	0,0033	0,00006
Incetitude-type associée	0,0072	0,00013



## 3.2. LE VOLTMÈTRE

### 3.2.1. Étalonnage

Le voltmètre est utilisé sur le calibre 200 mV.

Dans le certificat d'étalonnage, on trouve la correction d'étalonnage pour le point 100 mV, soit : -0,003mV et l'incertitude d'étalonnage associée :  $5 \cdot 10^{-5} \cdot U + 0,5 \mu\text{V}$  soit  $5,5 \mu\text{V}$  ( $k=2$ ).

On en déduit :  $u(C_{V \text{ étal}}) = 2,7 \mu\text{V}$

### 3.2.2. Dérive

L'examen des deux derniers certificats d'étalonnage du voltmètre montre que les corrections à appliquer à celui-ci, pour le point 100 mV, ont varié entre -0,001 mV et 0,003 mV. Sans connaissance spécifique du comportement de l'appareil, la loi de distribution rectangulaire est appliquée à la dérive :

On en déduit :  $u(C_{V \text{ dérive}}) = \frac{4}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 1,2 \mu\text{V}$

### 3.2.3. Résolution

La résolution du voltmètre numérique est égale à  $1 \mu\text{V}$ . L'incertitude-type correspondante est obtenue en divisant par  $\sqrt{12}$  la résolution :

On en déduit :  $u(C_{V \text{ résolu}}) = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,3 \mu\text{V}$

### 3.2.4. Impédance d'entrée du voltmètre

L'influence de l'impédance d'entrée du voltmètre est négligeable, l'impédance étant très grande devant la valeur du shunt.

De même, on néglige, dans cet exemple, l'effet d'un éventuel courant d'entrée (son effet serait négligeable devant celui mesuré) ainsi que l'influence d'une tension de mode commun.

## 3.3. LE SHUNT

### 3.3.1. Étalonnage

Le shunt a été étalonné sous un courant de 1A et pour une température de 23°C. Le résultat d'étalonnage est :

$R = 0,099992 \Omega$ , avec une incertitude relative d'étalonnage de  $2 \cdot 10^{-4}$  ( $k=2$ ).

On en déduit :  $u(C_{R \text{ étal}}) = 10 \mu\Omega$

### 3.3.2. Dérive

Le suivi métrologique a permis d'estimer la dérive entre deux étalonnages :  $3 \mu\Omega$  par an. Sans connaissance spécifique du comportement de l'appareil, la loi de distribution rectangulaire est appliquée à la dérive :

On en déduit :  $u(C_{R \text{ dérive}}) = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,9 \mu\Omega$

### 3.3.3. Effet de la température

La température du shunt, au moment de la mesure, est d'environ 22°C. Le coefficient de température a été préalablement estimé à  $50 \cdot 10^{-6} \cdot R / ^\circ\text{C}$ . La valeur de la résistance doit être corrigée de  $-1 \times 50 \cdot 10^{-6} \times 0,1$  soit  $-5 \mu\Omega$

Les mesures sont effectuées dans un local climatisé dont la température est comprise entre 20°C et 24°C ( $\Delta T = 2^\circ\text{C}$ ). En admettant que la température oscille entre ces bornes, la loi de distribution

associée est en arc sinus. L'estimation de l'incertitude-type associée se fait en divisant par  $\sqrt{2}$  l'erreur maximale :

$$\text{On en déduit : } u(C_{R \text{ temp}}) = \frac{50}{\sqrt{2}} \cdot 2 \cdot 0,1 = 7 \mu\Omega$$

### 3.3.4. Échauffement

Les résultats d'étalonnage sont donnés en fonction du courant. Les écarts observés pour des courants de mesure inférieurs à 5A sont inférieurs à  $2 \mu\Omega$ . On en déduit que pour un courant de mesure de 1A, le shunt est insensible aux effets de puissance.

## 3.4. L'AMPÈREMÈTRE

### 3.4.1. Résolution

L'ampèremètre est utilisé sur le calibre 2 A.

La résolution de l'ampèremètre numérique est égale à  $10 \mu\text{A}$ . L'incertitude-type correspondante est obtenue en divisant par  $\sqrt{12}$  la résolution :

$$\text{On en déduit : } u(C_{I \text{ résolu}}) = \frac{10}{\sqrt{12}} = 3 \mu\text{A}$$

### 3.4.2. Courants de fuite à l'entrée de l'ampèremètre

Sur le calibre 2A, la chute de tension aux bornes de l'ampèremètre étant inférieure à 0,5V (spécifications du constructeur), l'impédance d'entrée est inférieure à  $0,25\Omega$ .

Les résistances de fuite ( $> 1 \text{ T}\Omega$ ) sont évaluées et sont largement supérieures à l'impédance d'entrée de l'ampèremètre. L'influence des courants de fuite est négligeable.

## 4. CALCUL DE L'INCERTITUDE COMPOSÉE SUR LA GRANDEUR MESURÉE

### 4.1. LOI DE PROPAGATION DES INCERTITUDES

Partant de la relation établie en 2.3 :  $\delta = \frac{\bar{I}_v + C_v}{R + C_R} - \bar{I}_a + C_I$

il vient : 
$$d(\delta) = \frac{1}{R} d(\bar{I}_v + C_v) - \frac{(\bar{I}_v + C_v)}{(R + C_R)^2} d(R + C_R) - d(\bar{I}_a) + d(C_I)$$

$$d(\delta) = \frac{1}{R} (d\bar{I}_v + dC_v) - \frac{U}{R^2} (dR + dC_R) - d(\bar{I}_a) + d(C_I)$$

La loi de propagation des incertitudes conduit à :

$$u^2 = \frac{1}{R^2} [u^2(\bar{I}_v) + u^2(C_v)] + \frac{U^2}{R^4} [u^2(R) + u^2(C_R)] + u^2(\bar{I}_a) + u^2(C_I)$$

### 4.2. APPLICATION DE LA LOI DE PROPAGATION DES INCERTITUDES

Le courant de mesure est donc : 
$$I_a = \frac{(100,118 - 0,003) \cdot 10^{-3}}{(0,099992 - 0,000005)} = 1,00128 \text{ A}$$

L'ampèremètre affichant 1,00130 A, la correction d'étalonnage est - 0,02 mA.  
Le tableau suivant présente une synthèse du calcul.

Composante de l'incertitude type $u(x_i)$	Source de l'incertitude	Valeur de l'incertitude type $u(x_i)$	Coefficient de sensibilité $C_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$	$u_i(I) =  C_i  u(x_i)$ (mA)
$I$ $u(C_V \text{ étal})$ $u(C_V \text{ dérive})$ $u(C_V \text{ résolu})$	<u>Voltmètre</u> Lecture Etalonnage Dérive Résolution Impédance d'entrée	7,2 $\mu\text{V}$ 2,7 $\mu\text{V}$ 1,2 $\mu\text{V}$ 0,3 $\mu\text{V}$ -	$\frac{1}{R} = 10$	0,072 0,027 0,012 0,003
$u(C_R \text{ étal})$ $u(C_R \text{ dérive})$ $u(C_R \text{ temp})$	<u>Shunt</u> Etalonnage Dérive Température Echauffement	10 $\mu\Omega$ 0,9 $\mu\Omega$ 7 $\mu\Omega$ -	$\frac{U}{R^2} = \frac{0,1}{(0,1)^2} = 10$	0,1 0,009
$u(I_1)$ $u(C_i \text{ résolu})$	<u>Ampèremètre</u> Fluctuations lecture Résolution Courants de fuite	0,13 mA 3 $\mu\text{A}$ -	1	0,13 0,003 -
Incertitude-type composée = somme quadratique des incertitudes-type = 0,2 mA				
Incertitude élargie ( $k = 2$ ) = 0,4 mA				

## 5. EXPRESSION FINALE DU RÉSULTAT ET DE SON INCERTITUDE

L'incertitude élargie (avec un facteur d'élargissement de 2) est égal à : 0,4 mA.

Le résultat final s'exprime de la manière suivante :

$$\delta = (-0,02 \pm 0,4)\text{mA}$$

La correction d'étalonnage du point 1A est - 0,02 mA, avec une incertitude de  $\pm 0,4$  mA.

